

**EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD SÍSMICA PARA UN
SECTOR DE LA COMUNA 2 DEL MUNICIPIO DE
DOSQUEBRADAS-RISARALDA-COLOMBIA**



AUTOR

MARIA ANDREA VILLALBA YATE

MANUEL FERNANDO GONZALEZ D

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

INGENIERO CIVIL

Director:

SAIETH BAUDILIO CHAVEZ PABÓN

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

FACULTAD DE ESTUDIOS A DISTANCIA

PROGRAMA INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ, 03 DE NOVIEMBRE DE 2020

EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD SÍSMICA PARA UN SECTOR DE LA COMUNA 2 DEL MUNICIPIO DE DOSQUEBRADAS-RISARALDA-COLOMBIA

EVALUATION OF SEISMIC VULNERABILITY FOR A SECTOR OF COMMUNE 2 OF THE MUNICIPALITY OF DOSQUEBRADAS-RISARALDA-COLOMBIA

Manuel Fernando González D¹, María Andrea Villalba-Yate²

^{1,2}Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.

Facultad de Estudios a Distancia, Universidad Militar Nueva Granada, Programa Ingeniería Civil-Bogotá-Colombia. Email: ²d7303022@unimilitar.edu.co

Resumen

Introducción: En este artículo se exponen los diferentes aspectos que se tuvieron en cuenta para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones del grupo II, III y IV en un amplio sector del municipio de Dosquebradas-Risaralda conocido como Comuna 2.

Objetivo: Realizar mediante la metodología de la Plataforma de Evaluación Probabilística de Riesgos Naturales - Comprehensive Approach to Probabilistic Risk Assessment (CAPRA-GIS), los parámetros de amenaza sísmica generados por la intensidad de movimiento.

Metodología: Consiste en la evaluación de las construcciones edificaciones del grupo II, III y IV donde se realizó visitas de campo en cada uno de los predios de la comuna dos con el apoyo de herramientas de información geográfica y recolección de información secundaria ante diferentes entidades del municipio.

Resultados: A partir de la información recolectada se procede con el análisis de datos para suministrar al programa CAPRA- GIS. De acuerdo a la información y la amenaza con las respectivas funciones de vulnerabilidad, se realizó el proceso de modelación con el software CAPRA-GIS del cual se obtienen los índices de daño de las edificaciones en los diferentes escenarios sísmicos, cuantificando pérdidas humanas y materiales.

Conclusiones: Se logró identificar las edificaciones de mayor vulnerabilidad, las características constructivas de cada tipo de edificación, y los diferentes escenarios sísmicos, análisis de pérdidas humanas y el valor de daño de pérdidas de las edificaciones.

Originalidad: Actualmente el Municipio de Dos Quebradas-Risaralda en la comuna dos no cuenta con el análisis de vulnerabilidad sísmica y se podría emplear en los POT del municipio.

Limitaciones: El acceso a las edificaciones debido a la pandemia COVID-19, con el fin de obtener información más detallada.

Palabras clave: Riesgo sísmico; Vulnerabilidad; Amenaza sísmica; CAPRA-GIS; Mitigación sísmica.

Abstract

Introduction: This article presents the different aspects that were taken into account for the evaluation of the seismic vulnerability of the buildings of the group II, III and IV in a wide sector of the municipality of Dosquebradas-Risaralda known as commune 2.

Objective: To use the methodology of the Comprehensive Approach to Probabilistic Risk Assessment (CAPRA-GIS), the parameters of seismic threat generated by the intensity of movement.

Methodology: It consists of the evaluation of the constructions of the group II, III and IV where field visits were made in each one of the premises of the commune with the support of tools of geographic information and collection of secondary information before different organizations of the municipality.

Results: From the information collected, data analysis is carried out to supply the CAPRA-GIS program. According to the information and the threat with the respective vulnerability functions, the modeling process

was carried out with the CAPRA-GIS software from which the damage indexes of the buildings in the different seismic scenarios are obtained, quantifying human and material losses.

Conclusions: It was possible to identify the most vulnerable buildings, the constructive characteristics of each type of building, and the different seismic scenarios, analysis of human losses and the damage value of building losses.

Originality: Currently the municipality of Dos Quebradas-Risaralda in commune two does not have the analysis of seismic vulnerability and could be used in the municipality's POT.

Limitations: Access to buildings due to the COVID-19 pandemic, in order to obtain more detailed information.

Keywords: Seismic risk; Vulnerability; Threat; CAPRA-GIS; Seismic Reduction.

I. INTRODUCCIÓN

El municipio de Dosquebradas al igual que muchos de los municipios ubicados en zonas de sismicidad alta no cuenta ni con los recursos económicos, equipos o profesionales que puedan realizar los estudios como los exige el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) es por esto que surge la necesidad de realizar un plan indicativo de amenaza por sismo en las edificaciones de este municipio.

El estudio de la vulnerabilidad sísmica en un municipio es una herramienta clave para la planificación del territorio. Diferentes componentes que lo integran son potencialmente vulnerables, entre ellos la infraestructura física y sus edificaciones, que se caracterizan por ser construidas de manera simultánea al crecimiento y desarrollo en búsqueda de satisfacer las necesidades básicas de la población, destacándose las edificaciones públicas indispensables.

El presente documento, expone la aplicación de los diferentes aspectos que se tuvieron en cuenta para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica en las edificaciones del grupo II, III, y IV para el sector de la comuna 2 de Dosquebradas-Risaralda Colombia, en donde se utilizó la metodología de la Plataforma de Evaluación Probabilística de Riesgos Naturales (CAPRA-GIS).

Se desarrolló un proceso metodológico que proporcionó los insumos necesarios para la aplicación de la plataforma (CAPRA-GIS), Permitiendo de esta manera generar unos resultados que serán útiles para la planificación urbana, ya que el municipio es un complejo urbano potencialmente vulnerable en cuanto a la infraestructura existente.

La metodología utilizada permitió conocer la estimación de la vulnerabilidad indicativa y el riesgo sísmico en porcentajes de daños y afectación en pérdidas humanas y físicas de la Comuna 2 del municipio de Dosquebradas-Risaralda.

II. ESTADO DEL ARTE

Para conocer el estado del arte de los estudios de evaluación de la vulnerabilidad sísmica y el riesgo sísmico se hace necesario hacer la revisión de algunas referencias que servirán de base para ampliar la información sobre los estudios de riesgo sísmico y la importancia que implica desarrollarlos:

Suárez y Dávila [1] evalúan la vulnerabilidad sísmica, en términos cualitativos, de 65 edificaciones educativas del sector público, ubicadas a lo largo de la terraza de la ciudad de Mérida, para estimar un índice que permita conocer las condiciones que presenta la estructura ante la eventualidad de un sismo regional. En la ciudad de Bogotá, se han realizado diferentes estudios como el desarrollado por Muñoz [2], en donde determinó los índices de vulnerabilidad sísmica para la localidad de Ciudad Bolívar, (Bogotá). En el desarrollo del proyecto se empleó un método cualitativo que permitió la determinación de dichos índices, evaluando los aspectos más incidentes en la vulnerabilidad sísmica como: las tipologías estructurales, constructivas y la formación geológica sobre la cual se asentaba la población estudiada. En el (2016) Se realizó un estudio de evaluación de la vulnerabilidad para la comuna 9 de Armenia llevado a cabo por Torres y Aguillón [3], en donde se estimaron las pérdidas físicas (económicas) en el caso de eventos sísmicos en la ciudad, considerando cuatro escenarios sísmicos cuantificando las pérdidas físicas y humanas.

Para este análisis de riesgo se utilizó la metodología y herramientas de la plataforma CAPRA-GIS. Es importante aclarar que diferentes tipos constructivos identificados se caracterizaran mediante una función de vulnerabilidad, la cual expresa el comportamiento esperado de cada sistema estructural. El análisis de vulnerabilidad propuesto por la Evaluación de Riesgos Naturales – América Latina [4], el cual ha sido realizado por diferentes autores y por ERN, donde es necesario considerar la metodología utilizada en estos estudios; continuando con la

revisión se cita entonces el trabajo realizado por Yamin [5] en donde se hizo una modelación probabilista del riesgo de desastre asociado a amenazas naturales, haciendo especial énfasis en el caso sísmico y el riesgo que se deriva de inundaciones y deslizamientos urbanos. Este estudio ilustró una serie de casos reales de análisis del riesgo que han sido útiles para implementar acciones de gestión del riesgo de desastres. En el 2015, Ramírez [6] realizó un estudio en el que se identificaron criterios normativos que regulan la reducción de la vulnerabilidad sísmica en construcciones existentes y en aquellas sujetas a restauración. Al igual que Olaya [7] realizó un estudio de dinámica estructural de viviendas con acelerómetros sísmicos y con modelaciones por elementos finitos. En el municipio de Dosquebradas C. E. Cardona et al [8] realizaron un estudio de vulnerabilidad estructural de las edificaciones indispensables del sector educación del grupo III en el municipio de Dosquebradas, Risaralda. Carrillo [9] presenta la descripción detallada y un caso de estudio de una de las técnicas disponibles para la realizar un estudio de vulnerabilidad sísmica utilizando un enfoque de diseño por desempeño. La revaluación de la amenaza sísmica en Colombia, según los autores mencionados, señala que los parámetros manejados hasta hoy, cambian en algunos sitios del país al tener en cuenta esta nueva falla en el modelo tectónico utilizado para definir las exigencias del Reglamento Colombiano de Construcción Sismoresistente (NSR-10), según comenta Zuluaga et al [10].

De acuerdo a lo revisado, como equipo de trabajo se propuso que la determinación de la Vulnerabilidad Sísmica en una ciudad o región es una herramienta muy útil para la planificación urbana. El municipio de Dosquebradas al igual que muchos de los municipios ubicados en zonas de sismicidad alta no cuenta ni con los recursos económicos, equipos o profesionales que puedan realizar los estudios como los exige la NSR-10 [11] es por esto que surgió la necesidad de realizar un análisis de escenarios de riesgo sísmico en la comuna 2 del municipio de Dosquebradas. Para la presente propuesta, se hizo necesario obtener información sobre la amenaza y la vulnerabilidad sísmica a la cual podrían estar sometidas las edificaciones y habitantes de la comuna mencionada. La evaluación del riesgo se realizó con el objetivo de obtener los porcentajes de daños esperados en cada una de las edificaciones presentes en la zona de estudio y la afectación sobre la población.

III. LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MUNICIPIO

El Municipio de Dosquebradas está localizado al sur oriente del Departamento de Risaralda, su cabecera municipal limita con la de la Ciudad de Pereira conformando una conurbación. El área del municipio es de 70.81 km² (7,081 Ha), de los cuales 13 km², aproximadamente, corresponden a la zona urbana.

Dosquebradas conforma el Área Metropolitana Centro Occidente con los municipios de Pereira y La Virginia, además pertenece a la Subregión 1 (ver Figura 1), con los municipios de Pereira, Santa Rosa de Cabal y Marsella de acuerdo al proceso de Planificación Ambiental del Territorio realizado por la CARDER [12] [13]; ya que estos cuatro municipios presentan características biofísicas, socioeconómicas y culturales similares, además de concentrarse allí la mayoría de la población y los procesos económicos y sociales más significativos del departamento.



Fig. 1. Localización de Dosquebradas en el departamento de Risaralda.

IV. METODOLOGÍA

A continuación, se describe los pasos metodológicos que permitió llevar a cabo el proyecto de grado EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD SÍSMICA PARA UN SECTOR DE LA COMUNA 2 DEL MUNICIPIO DE DOSQUEBRADAS-RISARALDA-COLOMBIA y de esta forma lograr el objetivo general y cada uno sus alcances.

a. INVENTARIO Y CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR (TRABAJO DE CAMPO):

La primera fase consistió en la implementación de la ficha creada por el Sistema Nacional de Protección Civil Centro Nacional de Prevención de Desastres

(México) (ver imagen 1), para la captura de datos de la evaluación estructural. Esta ficha permitió la recolección de las características de las edificaciones de la zona de estudio. En este formulario se consignaron variables como: Uso, Área, Número de pisos, Estrato socioeconómico, Edad, Tipo de Cubierta, Calidad de la Construcción, Configuración Estructural y Tipo de Estructura, necesarias para que en la plataforma de CAPRA-GIS se pudiera calcular los índices de daños en cada edificación.

En esta primera fase se solicitó información ante la Secretaría de Educación del Municipio de Dosquebradas-Risaralda, Secretaria de Obras e Infraestructura, Secretaria de Planeación, Secretaria de Hacienda y Dirección de Gestión del Riesgo, las cuales facilitaron los inventarios de instituciones de uso dotacional, edificaciones indispensables existentes, vulnerabilidad estructural o riesgos asociados a la zona de estudio y avalúos catastrales de cada una de las edificaciones que se evaluaron. A partir de esta información se realizó el levantamiento de campo de los predios.

Teniendo los documentos suministrados por las entidades públicas anteriormente mencionadas, se continuo con el trabajo de campo, consistente en el diligenciamiento de la ficha de recolección de datos propuesta “Formato de Captura de Datos para la Evaluación Estructural” (ver imagen 1). Con el diligenciamiento de esta ficha, se pudo contar con información primaria como edad de la construcción, tipología constructiva, número de estudiantes y docentes, coordenadas, numero de reforzamientos. A partir de la información recolectada se logró identificar la gran mayoría de variables y se procedió con el análisis de datos para suministrar al programa CAPRA-GIS.

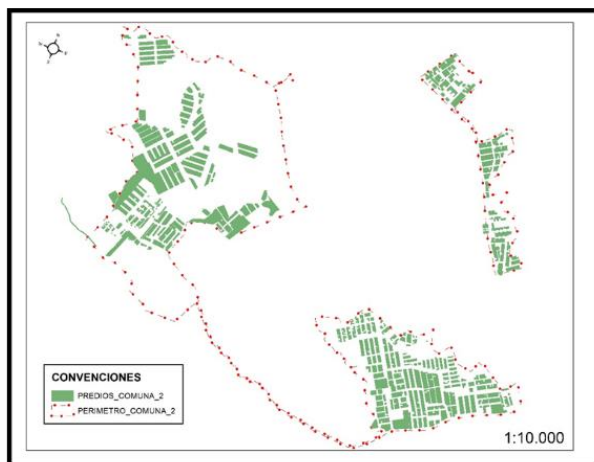
Imagen 1: Formato de Recolección de datos.

Fuente: sistema nacional de protección civil centro nacional de prevención de desastres. (México)

b. CÁLCULO DE VULNERABILIDAD INDICATIVA:

Posterior al inventario y la clasificación de las edificaciones se procedió a determinar las densidades de construcción de cada predio de acuerdo a las cartas catastrales del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y el correspondiente estrato socioeconómico con base en el plano de estratificación socioeconómica de planeación municipal. Se realizó la superposición de los planos de zonificación sísmica y geotécnica elaborados por la Dirección de Gestión del Riesgo (DIGER), lo cual permitió obtener el tipo de suelo correspondiente a cada edificación de la zona de estudio.

Para la evaluación de los escenarios sísmicos se realizó la selección de los sismos, de tal manera que permitió la modelación de los diferentes escenarios sísmicos (cercano, intermedio y lejano) y donde cada uno de ellos estuvo sujeto a modificaciones en su magnitud. Se organizó la información recolectada en una base de datos, con el fin de ser procesado por el programa CAPRA-GIS, con la cual se calcularon los índices de daño para las edificaciones, estableciendo los escenarios sísmicos hipotéticos.



Para la evaluación del riesgo sísmico con base en las pérdidas esperadas, se realizó con CAPRA-GIS la Evaluación Probabilista de Riesgo, en primer lugar, se escogió las funciones de vulnerabilidad con base al programa ERN (evaluación de riesgos naturales) esta vulnerabilidad trae una base de datos propuesta por diferentes autores y por ERN, además se realizó la modificación teniendo en cuenta cada una de las características propias de los tipos constructivos a modelar. Posterior a esto con el programa CAPRA-GIS el cual es un sistema de información geográfica, se ingresaron los datos requeridos por este programa, donde, permitió obtener los indicadores del riesgo sísmico y se reflejaron los niveles de las pérdidas económicas esperadas en las edificaciones, según los escenarios de amenaza sísmica utilizados.

c. ELABORACIÓN DE MAPAS

Con los resultados que se obtuvieron mediante la plataforma CAPRA-GIS, se analizaron y representaron gráficamente cada una de las variables y posteriormente se obtuvieron los mapas digitales que contienen la información de los niveles del riesgo sísmico de las edificaciones de la zona de estudio, por último, se realizaron las conclusiones y se presentaron las recomendaciones.

d. PLAN DE CONTINGENCIAS

Para una efectiva planificación de la respuesta ante las emergencias, es importante conocer su naturaleza y magnitud de los eventos probables que las podrían generar. Tener una aproximación sobre el tipo, intensidad y distribución espacial de los posibles daños ayuda a dimensionar las tareas de respuesta y recuperación post desastre. En consecuencia, tal información brinda mejores condiciones para definir

y diseñar políticas específicas de respuestas inmediatas.

De los posibles escenarios de riesgo sísmico planteados se debe determinar un patrón de respuesta que pueda ser incluido en la Estrategia Municipal de Respuesta (EMRE), en el cual se incluyan las actuaciones de los organismos de socorro como primeros respondientes.

V. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Siguiendo la metodología planteada se pudo contar con la siguiente información:

a. INVENTARIO Y CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR

A partir de la información recolectada con las diferentes entidades mencionadas anteriormente se obtuvo el inventario de instituciones educativas que hacen parte de la comuna 2 del municipio de Dosquebradas -Risaralda, se recolectó información primaria en campo de los predios a evaluar en esta misma comuna, de donde se logró poder determinar las siguientes características: edad de la construcción, tipología constructiva, número de estudiantes y docentes, coordenadas, número de reforzamientos si han tenido lugar además de la construcción de los polígonos y su respectiva área en planta y área construida.

Inicialmente se propuso realizar el estudio para edificaciones del grupo II, III y IV pero debido a que son pocos predios para el área de estudio se decidió incluir las edificaciones del grupo I, de esta manera poder tener más datos para poder evaluar; en la figura 2 se puede observar los predios evaluados en la comuna objeto del presente proyecto.

Fig. 2. Plano Comuna 2 de Dosquebradas
Fuente: Elaboración propia

SELECT ID	CODIGO	TIPO CONST	TIPO DOMN	AREA	NUM PZDS	AREA PLANT	VALFS	VALRUM	SF SE/SIO
2308	6617001000000000000000000000000000	CONVENIONAL	PRIVADO	1753.978	1	1753.978	56366500	3.718	CP-S/MS-1
4259	6617001000000000000000000000000000	CONVENIONAL	PRIVADO	1636.547	1	1636.547	1207000	3.631	MS-S/MS-1
4184	6617001000000000000000000000000000	NO CONVENIONAL	PRIVADO	11889.323	1	11889.323	49757000	3.651	MS-S/MS-1
4185	6617001000000000000000000000000000	CONVENIONAL	PRIVADO	465.118	1	465.118	7777900	3.651	MS-S/MS-1
4186	6617001000000000000000000000000000	CONVENIONAL	PRIVADO	322.071	1	322.071	1875000	3.651	MS-S/MS-1
2855	6617001000000000000000000000000000	CONVENIONAL	PRIVADO	259.214	2	126.60634	3387000	3.878	CP-F/MS-2
2856	6617001000000000000000000000000000	CONVENIONAL	PRIVADO	259.214	1	126.60634	154.0641	3.878	CP-RC-MS-1
2857	6617001000000000000000000000000000	CONVENIONAL	PRIVADO	142.054	1	142.054	468000	3.878	CP-F/MS-2
4684	6617001000000000000000000000000000	CONVENIONAL	PRIVADO	182.197	2	91.0979	7375000	3.878	CP-F/MS-2
2601	6617001000000000000000000000000000	CONVENIONAL	PRIVADO	145.829	2	72.9064	4178400	3.878	CP-F/MS-2
2602	6617001000000000000000000000000000	CONVENIONAL	PRIVADO	139.376	1	139.376	1102000	3.878	CP-F/MS-2
2609	6617001000000000000000000000000000	CONVENIONAL	PRIVADO	180.892	2	90.4466	9378000	3.878	CP-F/MS-2
2610	6617001000000000000000000000000000	CONVENIONAL	PRIVADO	44.544	1	44.544	1759000	3.878	CP-F/MS-2
2855	6617001000000000000000000000000000	CONVENIONAL	PRIVADO	351.498	2	175.9486	6812200	3.878	CP-F/MS-2
4187	6617001000000000000000000000000000	CONVENIONAL	PRIVADO	79.500	1	79.500	2625000	3.651	MS-S/MS-1
4188	6617001000000000000000000000000000	CONVENIONAL	PRIVADO	529.791	1	529.791	4665700	3.631	MS-S/MS-1
4189	6617001000000000000000000000000000	CONVENIONAL	PRIVADO	1831.710	1	1831.710	19002800	3.651	MS-S/MS-1
4190	6617001000000000000000000000000000	CONVENIONAL	PRIVADO	6045.298	1	6045.298	26333000	3.651	MS-S/MS-1
4191	6617001000000000000000000000000000	CONVENIONAL	PRIVADO	356.032	1	356.032	3355000	3.651	MS-S/MS-1
2639	6617001000000000000000000000000000	CONVENIONAL	PRIVADO	6053.840	2	3025.921	21859000	3.651	MS-PPS-2
2638	6617001000000000000000000000000000	CONVENIONAL	PRIVADO	519.463	1	519.463	5669000	3.651	CP-S/MS-1
2639	6617001000000000000000000000000000	CONVENIONAL	PRIVADO	372.765	1	372.765	5649000	3.651	CP-S/MS-1
3893	6617001000000000000000000000000000	CONVENIONAL	PRIVADO	449.628	1	449.628	2609900	3.651	CP-S/MS-1
3105	6617001000000000000000000000000000	CONVENIONAL	PRIVADO	50.678	1	50.678	2007200	3.651	MS-S/MS-1
3104	6617001000000000000000000000000000	CONVENIONAL	PRIVADO	261.551	1	261.551	1278400	3.651	MS-S/MS-1
1705	6617001000000000000000000000000000	CONVENIONAL	PRIVADO	96.578	1	96.578	288000	4.075	CP-S/MS-1

Se muestran los atributos correspondientes a la información relevante que permitió realizar la evaluación en el programa, teniendo en cuenta las siguientes variables: Identificación, código predial, Tipo de construcción, Número de pisos, Área planta, Avalúo, Ocupación humana y Sistema estructural, ya que fue información indispensable para realizar el análisis de vulnerabilidad, determinado por pérdidas físicas y humanas de acuerdo a los resultados de CAPRA-GIS.

Un total de 4607 edificaciones en un área de 117.37 hectáreas fueron evaluadas para el presente trabajo, como se puede apreciar en la tabla 2; 4376 estructuras fueron construidas antes de 1984, y probablemente se construyeron sin tener en cuenta alguna norma sismorresistente, además se sabe que el primer código sismorresistente que entró en vigor para Colombia fue el Código Colombiano de Construcciones de Sismoresistencia del año 1984 (CCCSR-84). 2903 viviendas son de 1 piso, 1473 son viviendas de 2 pisos construidas entre 1984 y 1998 durante la vigencia del Código Colombiano de Construcciones Sismorresistentes antes mencionado, 224 son de 3 pisos y fueron construidas después de 1998 bajo la vigencia del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-98. 5

NÚMERO DE PISOS	CANTIDAD	Fr	%
1	2903	0.63012807	63.01
2	1473	0.31973084	31.97
3	224	0.04862166	4.86
4	5	0.0010853	0.11
5	1	0.00021706	0.02
12	1	0.00021706	0.02
TOTAL	4607		

NÚMERO DE PISOS	PORCENTAJE %
1	63.01
2	31.97
3	4.86
4	0.11
5	0.02
12	0.02

Los tipos de construcciones que generalmente se encuentran en estas áreas de la comuna dos, sin que cumplan con los requisitos de las NSR-10 en esta ciudad, son: pórticos de concreto reforzado sin conceptos de ingeniería con muros de mampostería y

estructuras de mampostería confinada o no confinada que en la mayoría de los casos no tienen refuerzo; es importante anotar que la mayoría de edificaciones del grupo III construidas en el municipio de Dosquebradas nacieron del interés de la comunidad por generar estos espacios, motivo por el cual la mayoría de estructuras se desarrollaron con trabajo y financiamiento comunitario, sin tener en cuenta la asesoría de profesionales (Ingenieros Civiles, Arquitectos o profesionales afines en la construcción con experiencia), es por esto que las edificaciones presentan como tipología estructural mampostería simple.

Las estructuras que presentan menor vulnerabilidad son aquellas que han sido diseñadas y construidas de acuerdo a las normas sismo resistentes que se han desarrollado para el país (1984; 1998, 2010). De acuerdo al reglamento colombiano de construcción sismorresistente NSR-10 “Los pórticos de concreto reforzado con muros, son estructuras que resisten cargas gravitacionales y presentan un buen comportamiento ante fuerzas sísmicas”.

Los muros de mampostería son usados como divisiones, pero no son diseñados para resistir cargas laterales; sin embargo, es importante resaltar que estos aumentan de manera importante la rigidez y la capacidad de la estructura para soportar dichas cargas. muchas estructuras son diseñadas de tal forma que los muros resistan toda la carga sísmica, estos deben ser confinados y/o reforzados; el confinamiento lo proporcionan columnas y vigas de borde de concreto reforzado. Los muros de mampostería reforzada generalmente contemplan barras de acero embebidas en juntas de mortero (refuerzo horizontal) y en celdas rellenas con mortero (refuerzo longitudinal). En todos los casos, los muros que resisten las cargas laterales deben ser continuos en altura.

El proyecto World Housing Encyclopedia encabezado por: Earthquake Engineering Research Institute (EERI) y la International Association for Earthquake Engineering (IAEE), se ha recolectado información acerca del tipo de edificaciones que se construye en varios países del mundo, incluido Colombia. Los informes presentados por estas instituciones generalmente hablan de dos tipologías de construcción que, por lo general, son las más usadas en áreas donde se ha construido sin normas sismo resistentes en la ciudad: pórticos de concreto reforzado sin normas sismo resistentes y estructuras de mampostería no reforzada; ambos informes fueron escritos por Mejía [14].

Los pórticos sin normas ingenieriles son bastante vulnerables a efectos sísmicos, debido a la limitada cantidad de refuerzo transversal (estribos), especialmente en las columnas. Este sistema estructural es muy flexible cuando se encuentra sometido a fuerzas sísmicas. La calidad de los materiales y la mano de obra es bastante deficiente. En muchos casos, los edificios de este tipo se construyen en un terreno muy escarpado y donde las propiedades mecánicas de los suelos son pobres.

La mampostería no reforzada es definida como un sistema estructural compuesto por unidades de ladrillos de arcilla o concreto y unidos mediante un mortero de pega (cemento y arena). Es un sistema estructural muy vulnerable a los efectos sísmicos debido a su comportamiento frágil; Según el Reglamento de Construcción Sismo Resistente NSR-10, este tipo de mampostería se clasifica como un sistema de capacidad mínima de disipación de energía y debe utilizarse solo en zonas de nivel de amenaza baja, demostrando un bajo desempeño sísmico en los sismos importantes ocurridos en Colombia. En la imagen 1 se presenta un ejemplo de las edificaciones descritas anteriormente.

Imagen 1. Edificaciones Típicas: Institución educativa Comuna



Fuente: el autor

**TABLA 3
TIPOLOGÍAS ESTRUCTURALES ENCONTRADAS
EN LA COMUNA 2.**

SISMO	CANTIDAD	fr	%
B-SLFB-1	1	0,00021706	0,02
CP-FLSB-2	653	0,14174083	14,17
CP-SLSB-1	721	0,15650098	15,65
MC-RLSB-2	7	0,00151943	0,15

MC-SLSB-1	16	0,00347298	0,35
MS-RPSB-2	110	0,02387671	2,39
MS-SLSB-1	849	0,18428478	18,43
PCR-RCSB-2	943	0,20468852	20,47
PCR-RCSM-5	172	0,03733449	3,73
PCR-SLSB-1	1133	0,24593011	24,59
W-FLFB-2	1	0,00021706	0,02
W-SLFB-1	1	0,00021706	0,02
TOTAL	4607		

Fig. 4. Tipologías Estructurales



Fuente: el autor

En la tabla 3 se muestra que la mayor cantidad de edificios con la tipología de pórticos en concreto tipo 1 son de 1113 edificaciones, seguido de pórticos en concreto tipo 2 son de 943 edificaciones; en la figura 4 se evidencia el porcentaje de cada una de las tipologías siendo la tipología de pórticos en concreto tipo 1 la más alta en un 24.59%, estos datos reflejan las características constructivas de las edificaciones de la comuna dos, sin embargo, es importante resaltar que existen tipologías de construcciones en madera y bahareque en 0.02%.

La evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las estructuras construidas sin conceptos de ingeniería en el municipio de Dosquebradas, proporciona información sobre la magnitud de las pérdidas que un sismo puede causar, y de este modo, permitiría a las autoridades de gestión del riesgo generar planes de acción que reduzcan el riesgo sísmico.

d. ESCENARIOS SÍSMICOS

Para determinar la aceleración máxima en la superficie y así tener en cuenta los efectos de sitio que se presentan en la zona, se tomaron 4 sondeos proporcionados por el Municipio de Dosquebradas mediante estudios de consultoría que se contrató a través de la Universidad Nacional de Manizales.

Se hizo uso del software STRATA [15] para determinar la aceleración máxima en el sitio a nivel de basamento rocoso, para establecer la amenaza y la vulnerabilidad ante esta. Luego, se observa y analiza la afectación que tienen las estructuras ante la ocurrencia del sismo en distintos escenarios; para este caso se tuvieron 3 escenarios como son: la falla 2 sísmica Romeral en campo cercano, falla sísmica Ibagué en Campo intermedio y falla sísmica Subducción en campo lejano, de acuerdo a Monsalve-Jaramillo & Ramos-Murillo [16]. En la tabla 4, se muestran las aceleraciones pico y frecuencias obtenidas mediante el software para cada uno de los sondeos, evaluados en los escenarios mencionados anteriormente.

TABLA 4.
ACELERACIÓN MÁXIMA, FRECUENCIA Y
PERIODO FUENTE CERCANA: ROMERAL

FUENTE ROMERAL	PERIODO	ACELERACIÓN	FRECUENCIA
La popa	0.4506	0.4988	2.219499398
Milán	0.4573	0.3672	2.186729633
La 50	0.4438	0.4418	2.252760242
Molivento	0.4641	0.4857	2.154443697

Fuente: el autor

TABLA 5.
ACELERACIÓN MÁXIMA, FRECUENCIA Y
PERIODO FUENTE INTERMEDIA: IBAGUÉ

FUENTE IBAGUÉ	PERIODO	ACELERACIÓN	FRECUENCIA
La popa	0.6438	0.2548	1.553160871
Milán	0.7252	0.1960	1.378913141
La 50	0.9621	0.2198	1.039436651
Molivento	0.9765	0.2358	1.024089904

Fuente: el autor

TABLA 6.
ACELERACIÓN MÁXIMA, FRECUENCIA Y
PERIODO FUENTE LEJANA: SUBDUCCIÓN

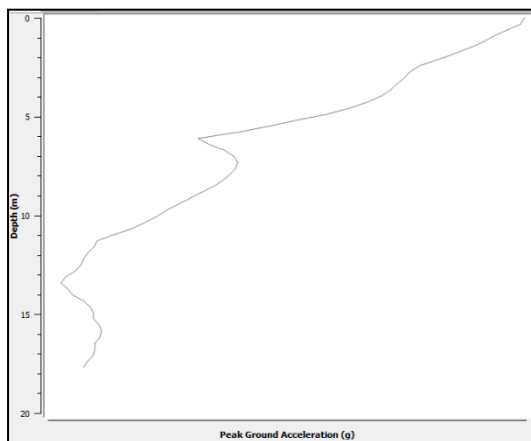
FUENTE SUBDUCCIÓN	PERIODO	ACELERACIÓN	FRECUENCIA
La popa	0.2598	0.1755	3.848334897
Milán	0.2637	0.1772	3.791516216
La 50	0.2676	0.1562	3.735536433
Molivento	0.2717	0.1279	3.680383162

Fuente: el autor

De acuerdo a las fallas que se encuentran cerca de la región y que son objeto de estudio como la falla Romeral, falla Ibagué y la falla de Subducción, se puede observar en las tablas 4, 5 y 6, los periodos, la aceleración y la frecuencia tomando como fuente cercana Romeral- Caldas, Intermedia Ibagué y Lejana Subducción para cada uno de los sondeos (la popa, Milán, La 50 y molivento) estos datos son muy dispersos, siendo la falla de Ibagué como la más alta, sin embargo no presenta mayor peligrosidad en el movimiento en un emplazamiento como consecuencia de un terremoto.

En la figura 5 se muestra el perfil de aceleración pico para el sondeo localizado en el sector la Popa en Dos quebradas para la fuente cercana Romeral.

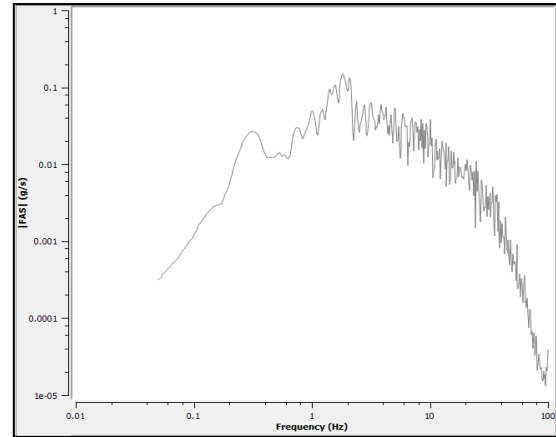
Fig. 5 Perfil de aceleración pico para el sondeo localizado en el sector la Popa en Dos quebradas para la fuente cercana Romeral.



Fuente: Rathje [15]

En la figura 6 se muestra el espectro de amplitud de Fourier para obtener de allí la frecuencia de caída correspondiente al sondeo La popa para fuente cercana Romeral.

Fig. 6. Espectro de amplitud de Fourier para obtener de allí la frecuencia de caída correspondiente al sondeo La popa para fuente cercana Romeral.



Fuente: Rathje [15]

e. DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA INDICATIVA

Para hacer el análisis respectivo se utilizó el programa CAPRA-GIS, en el cual se realiza la evaluación de la amenaza sísmica, la vulnerabilidad estructural y el riesgo físico teniendo como insumos un archivo de amenaza, uno de exposición y otro de efectos de sitio, y así poder obtener finalmente datos específicos sobre pérdidas físicas y humanas.

En cuanto al archivo de amenaza se tuvo en cuenta el Modelo Colombia-Caldas Tear, el cual contiene los escenarios por evaluar, correspondientes a la fuente cercana de las fallas sísmicas de (Romeral, Caldas), intermedia (Ibagué) y lejana (Subducción); en la primera hay un posible evento de magnitud de 6.52 Mw a una distancia hipo central de 15 ± 4 Km, la segunda fuente un evento de magnitud 6.74 Mw a una distancia hipo central de 45 ± 5 Km y la tercera un sismo de magnitud 8.3 Mw a una distancia hipo central de 120 ± 30 Km (Monsalve-Jaramillo & Ramos-Murillo, 2007) para cada escenario se obtuvieron las pérdidas físicas, humanas y el respectivo mapa de riesgo, los cuales se muestran más adelante.

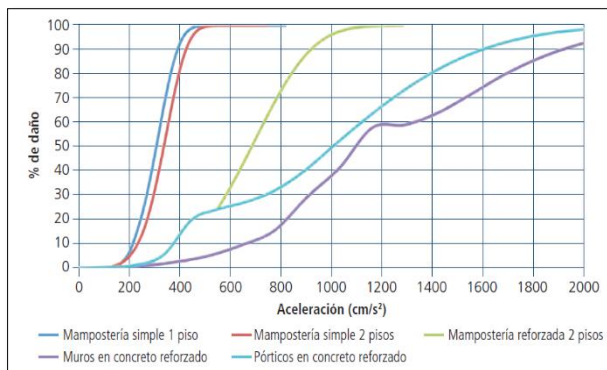
Al tener la amenaza, se procedió a cargar el archivo correspondiente a las funciones de vulnerabilidad, obtenidas en el ERN-Vulnerabilidad como complemento de CAPRA-GIS ajustadas al sistema estructural existente en la zona; dichas curvas se relacionan en la tabla 7.

TABLA 7.
CURVAS DE VULNERABILIDAD DE LA
TIPOLOGÍA REGIONAL

CURVA	DESCRIPCIÓN
PCR-RLSM-5	Pórticos en concreto RM- Rígido, cubierta Ligera, fachada frágil Sin dilatar, Medios-5
PCR-RCSB-2	Pórticos en concreto RM- Rígido, cubierta en Concreto, fachada frágil Sin dilatar, Bajos-2
MS-RPSB-2	Mampostería Simple- Rígido, cubierta Pesada, fachada frágil sin dilatar, Bajos- 2
MS-FLSB-2	Mampostería Simple- Flexible, cubierta Ligera, fachada frágil sin dilatar, Bajos- 2
MC-FPSB-2	Mampostería Confinada- Flexible, cubierta Pesada, Fachada frágil Sin dilatar, Bajos -2
CP-FLSB-2	Muros en concreto prefabricado-Flexible, cubierta ligera, Fachada frágil Sin dilatar, Bajos -2

Fuente: (Torres-Forero & Espitia-Aguillón, 2016)

En cuanto a la exposición se contó con un archivo de



atributos generado en el software ArcGIS versión 10.5, donde se consignó información estructural y características relevantes de las edificaciones de uso I, II, III y IV del municipio de Dosquebradas, como se puede ver en la Tabla 1 que muestra los atributos del shape de exposición y la figura 2 donde se visualiza el respectivo plano de la zona de estudio.

Cabe mencionar, que el programa CAPRA-GIS reconoce el archivo de exposición, solo si la tabla de atributos tiene la estructura definida en la tabla de la figura 7.

Fig.7. Configuración tabla de atributos archivo de exposición

ID	USO	NUM_PISOS	AREA	AREA_PLA
Object ID	String	Double	Double	Double
VALFIS	VALHUM	SE_SISMO	EDAD	
Double	Double	String	String	

Fuente: (Torres-Forero & Espitia-Aguillón, 2016)

Otro de los insumos necesarios para el análisis con el programa CAPRA-GIS, fue el archivo correspondiente a efectos de sitio, el cual contiene a su vez dos ficheros, el primero de ellos es el obtenido por el aplicativo SURFER, donde se genera una superficie que tiene como cotas la aceleración pico arrojada por STRATA para cada uno de los sondeos presentes en la zona de estudio, cuyo archivo tiene como extensión *.GRD* y el segundo corresponde a la función de transferencia generada por el complemento de efectos de sitio del programa CAPRA-GIS con extensión *.ft*, para este procedimiento se tuvieron en cuenta los datos consignados en las tablas 1, 2 y 3.

f. ELABORACIÓN DEL MAPA DE LAS EDIFICACIONES CON MAYOR ÍNDICE DE VULNERABILIDAD

En el siguiente punto se explican los momentos de vulnerabilidad física, vulnerabilidad humana.

Vulnerabilidad Física

Con base en la información sobre las edificaciones, la infraestructura y sus tipos estructurales, se usaron las funciones de vulnerabilidad determinadas por ERN [4], asociando una curva de vulnerabilidad a cada tipología estructural observada.

Fig. 8. Ejemplo funciones de vulnerabilidad para diferentes tipologías constructivas

Fuente: ERN [4]

En la figura 8, se presentan funciones de vulnerabilidad para diferentes componentes de la infraestructura ante las solicitaciones sísmicas. En estas funciones se utiliza, como medida de intensidad de la amenaza, la aceleración máxima del terreno en gales (cm/s^2) y como parámetro de vulnerabilidad el valor económico esperado del daño como porcentaje del valor de reposición total de cada componente.

Vulnerabilidad Humana

En la figura 9, se presentan funciones de vulnerabilidad para las pérdidas asociadas con afectaciones y daños físicos, para las personas que se encuentran en una parte del día dentro de cualquier edificación.

Mediante el software utilizado, se generaron indicadores de vulnerabilidad sísmica donde se reflejarán pérdidas económicas y humanas, con base en los resultados se realizó la representación gráfica de manera digital por medio de la herramienta CAPRA-GIS.

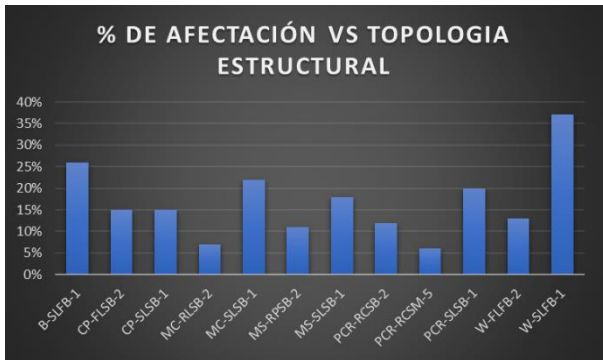
En la tabla 8, se muestra la recopilación de los resultados obtenidos de la evaluación por medio del programa CAPRA-GIS el cual proporciona las pérdidas físicas y humanas de los predios expuestos en cada uno de los escenarios probables escogidos inicialmente, en este caso las fallas sísmicas de: Romeral, Ibagué y Subducción. Así mismo, se puede apreciar en la figura 10 los porcentajes de afectación de acuerdo a la tipología estructural.

TABLA 8.
PÉRDIDAS ECONÓMICAS ASOCIADAS A LA
FUENTE CERCANA ROMERAL.

SISTEMA ESTRUCTURAL	CODIGO ESTRUCTURAL	AVALEO (COP)	PÉRDIDAS ESPERADAS (COP)	DAÑO ESPERADO PROMEDIO %
BAHAREQUE - Sin Diafragma, Cubierta Ligera, Fachada Flexible, Bajos - 1	B-SLFB-1	\$ 19.051.000	\$ 5.044.416,68	26%
MUROS EN CONCRETO PREFABRICADO- Flexible, Cubierta Ligera, Fachada Frágil sin dilatar, Bajos - 2	CP-FLSB-2	\$ 19.674.991.000	\$ 2.876.610.211,00	15%
MUROS EN CONCRETO PREFABRICADO- Cubierta ligera, Fachada en mampostería	CP-SLSB-1	\$ 18.496.899.000	\$ 2.685.911.937,79	15%
MAMPOSTERIA CONFINADA- Cubierta ligera, Fachada en mampostería	MC-RLSB-2	\$ 304.329.000,00	\$ 20.671.668,88	7%
MAMPOSTERIA CONFINADA- Cubierta ligera, Fachada en mampostería	MC-SLSB-1	\$ 227.913.000,00	\$ 49.007.374,19	22%
MAMPOSTERIA SIMPLE- Cubierta ligera, Fachada en mampostería	MS-RPSB-2	\$ 4.343.808.000,00	\$ 474.785.241,17	11%
MAMPOSTERIA SIMPLE- Cubierta ligera, Fachada en mampostería	MS-SLSB-1	\$ 20.223.564.000,00	\$ 3.619.581.333,67	18%
PORTICOS EN CONCRETO- Cubierta en concreto, Fachada en mampostería	PCR-RCSB-2	\$ 29.298.917.000,00	\$ 3.453.026.703,79	12%
PORTICOS EN CONCRETO- Rígido, Cubierta en concreto, Fachada Frágil sin dilatar, Medios	PCR-RCSM-5	\$ 9.983.570.000,00	\$ 641.124.134,77	6%
PORTICOS EN CONCRETO RIGIDO- Cubierta ligera, Fachada flexible	PCR-SLSB-1	\$ 25.043.709.000,00	\$ 5.118.471.432,71	20%
MUROS EN MADERA- Cubierta ligera, Fachada flexible	W-FLFB-2	\$ 2.082.342,86	\$ 2.082.342,86	13%
MUROS EN MADERA- Cubierta ligera, Fachada flexible	W-SLFB-1	\$ 2.332.624,50	\$ 2.332.624,50	37%

Fuente: El autor

Fig. 10. Porcentaje de afectación falla Romeral



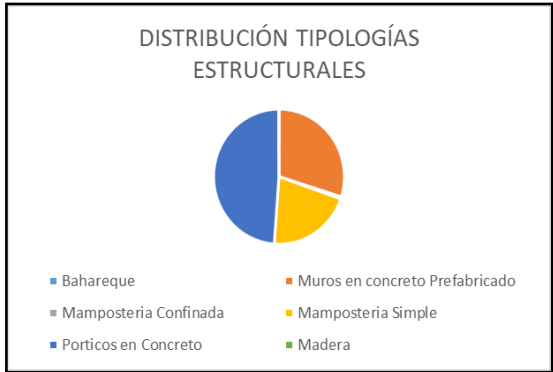
Fuente: El autor

TABLA 9.
DISTRIBUCIÓN TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL
COMUNA 2

TIPOLOGÍA	CANTIDAD
Bahareque	1
Muros en concreto Prefabricado	1374
Mampostería Confinada	23
Mampostería Simple	959
Pórticos en Concreto	2248
Madera	2
TOTAL	4607

Fuente: El autor

Fig. 11. distribución en la comuna 2 de acuerdo a las tipologías.



Fuente: El autor

De acuerdo a la tabla 9, de los 4607 predios expuestos 2248 de estos tienen como tipología estructural pórtico en concreto, 959 son en mampostería simple y 1374 están construidos en muros en concreto prefabricado.

De acuerdo a los resultados evidenciados en la figura 10, se puede decir que si bien es cierto la tipología del sistema de construcción con muros en madera, cubierta ligera y fachada flexible código W-FLFB-2 corresponde al 99.25%, siendo el promedio del daño esperado representado por un valor de \$2.082.342.86 de pérdidas esperadas, no es representativo, ya que dentro del inventario solo hay una en su tipo, sin embargo, para la tipología en pórticos de concreto rígido PCR SLSB-1, cuyo porcentaje promedio de daño esperado es del 14.95%, su valor de pérdidas

esperadas es de \$5.118.417.432,71, siendo el más representativo por su valor dentro del estudio de análisis de vulnerabilidad sísmica. Así mismo, viviendas construidas en muros en concreto prefabricado y mampostería simple representan elevadas pérdidas económicas ante un evento sísmico de acuerdo a la magnitud evaluada.

Según lo anterior, los sistemas estructurales con mayores pérdidas no cuentan con los requerimientos necesarios para afrontar un evento sísmico representativo, por ende se podría presentar perdidas económicas muy altas, que ponen en entre dicho la realización de diferentes trabajos encaminados a un reforzamiento estructural.

Dentro de las edificaciones del grupo II, III y IV, el número de edificaciones con mayor valor expuesto y el porcentaje de perdidas es más significativo, además la probabilidad de daños, aumenta marcadamente en las edificaciones de mampostería simple (sin confinar), seguido de edificaciones en pórticos en concreto.

Comparando los sistemas estructurales, en cada uno de los escenarios, de acuerdo a la tabla 10 se puede determinar que las perdidas físicas en el escenario de la falla sísmica Romeral se obtuvieron pérdidas de 13.64% en mampostería simple y confinada, en el segundo escenario, falla Ibagué, se obtuvieron perdidas bajas con un promedio de 0.94% en mampostería simple, en el escenario de falla sísmica de Subducción se encuentran las perdidas más altas de alrededor del 19%, siendo las afectaciones causadas por el escenario de falla sísmica de Subducción la que mayor afectación generan a esta tipología estructural.

TABLA 10.
PÉRDIDAS FÍSICAS ASOCIADAS A LA FALLA
ROMERAL, IBAGUÉ Y SUBDUCCIÓN.

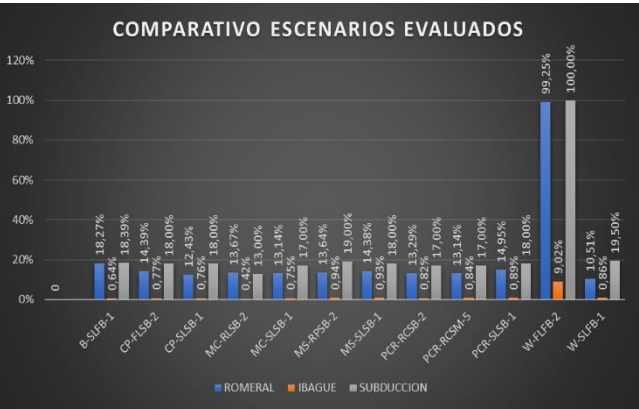
SISTEMA ESTRUCTURAL	NUMERO DE OCUPANTES	PERDIDAS ESPERADAS (HUMANOS)	PERDIDAS ESPERADAS PROMEDIO %
B-SLFB-1	4	0	8,86
CP-FLSB-2	2554	4	8,54
CP-SLSB-1	2755	3	8,34
MC-RLSB-2	25	0	7,73
MC-SLSB-1	64	0	8,69
MS-RPSB-2	407	1	8,08
MS-SLSB-1	3161	5	8,13
PCR-RCSB-2	3727	4	8,63
PCR-RCSM-5	663	1	8,42
PCR-SLSB-1	4483	7	8,64
W-FLFB-2	4	0	7,97
W-SLFB-1	4	0	7,97
TOTAL	17849	25	

Fuente: El autor

SISTEMA ESTRUCTURAL	ROMERAL	IBAGUE	SUBDUCCION
	DAÑO ESPERADO PROMEDIO %		
B-SLFB-1	18,27%	0,64%	18,39%
CP-FLSB-2	14,39%	0,77%	18,00%
CP-SLSB-1	12,43%	0,76%	18,00%
MC-RLSB-2	13,67%	0,42%	13,00%
MC-SLSB-1	13,14%	0,75%	17,00%
MS-RPSB-2	13,64%	0,94%	19,00%
MS-SLSB-1	14,38%	0,93%	18,00%
PCR-RCSB-2	13,29%	0,82%	17,00%
PCR-RCSM-5	13,14%	0,84%	17,00%
PCR-SLSB-1	14,95%	0,89%	18,00%
W-FLFB-2	99,25%	9,02%	100,00%
W-SLFB-1	10,51%	0,86%	19,50%

Fuente: El autor

Fig. 12. Comparativo pérdidas físicas



Fuente: El autor

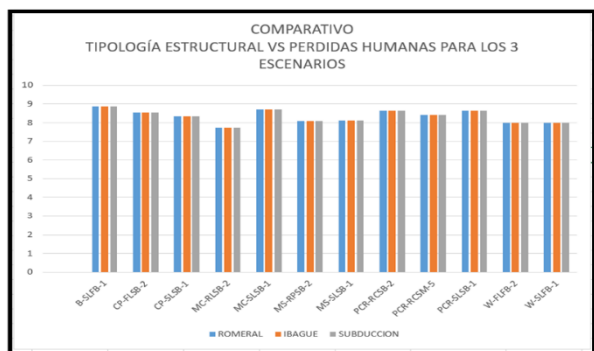
TABLA 11.
PÉRDIDAS FATALES ASOCIADAS A LA FALLA
ROMERAL

TABLA 12.
PÉRDIDAS HUMANAS PARA LOS 3 ESCENARIOS

TIPOLOGIAS	ROMERAL	IBAGUE	SUBDUCCION
	% PROMEDIO		
B-SLFB-1	8,86	8,86	8,86
CP-FLSB-2	8,54	8,54	8,54
CP-SLSB-1	8,34	8,34	8,34
MC-RLSB-2	7,73	7,73	7,73
MC-SLSB-1	8,69	8,69	8,69
MS-RPSB-2	8,08	8,08	8,08
MS-SLSB-1	8,13	8,13	8,13
PCR-RCSB-2	8,63	8,63	8,63
PCR-RCSM-5	8,42	8,42	8,42
PCR-SLSB-1	8,64	8,64	8,64
W-FLFB-2	7,97	7,97	7,97
W-SLFB-1	7,97	7,97	7,97

Fuente: El autor

Fig. 13. Porcentaje de afectación para los 3 escenarios



Fuente: El autor

De acuerdo al análisis de la muestra en el comparativo de pérdidas físicas para los tres escenarios que se muestra en la figura 12, las pérdidas físicas en el escenario de subducción alcanzaría el 100% y la falla Romeral sería del 99.25% para tipología W-FLFB-2, el sistema constructivo en madera presentaría una pérdida física bastante alta pero el costo del daño sería por un valor aproximado de \$ 4.414.967,36; para el caso de los pórticos en concreto rígido PCR, el porcentaje de pérdidas está alrededor de los \$9.212.622.271,47 en los costos de daño.

En la tabla 12 se evidencia que el porcentaje de pérdidas humanas son muy bajas frente al número de ocupantes siendo el 8.64% como la más alta es decir que de 4483 ocupantes las pérdidas humanas no sobrepasan más de 7 ocupantes, en cuanto a la mampostería confinada, las construcciones en madera y construcciones en bahareque no presenta

ningún tipo de pérdida humana, esto no significa que sean las tipologías de construcción más seguras, simplemente se debe a que la cantidad de ocupantes es menor comparado con las otras tipologías de construcción.

En la figura 13, se evidencia el porcentaje de pérdidas humanas esperadas con respecto a cada una de las tipologías constructivas, observando una variación muy mínima en cada uno de sus porcentajes, en las fallas de Romeral, Ibagué y subducción, es decir, que en cualquier tipo de sismo generado por estas fallas las pérdidas de vidas humanas estarían alrededor del 8.64%.

VI. CONCLUSIONES

La información recolectada en cada una de las entes territoriales del municipio permitió caracterizar las 4607 edificaciones, encontrándose las siguientes tipologías estructurales en la comuna 2 del municipio de Dosquebradas: 1 estructura en Bahareque; 1374 corresponden a muros en concreto prefabricado; 23 son en mampostería confinada - flexible, cubierta pesada, fachada frágil sin dilatar; 959 están construidas en mampostería simple, flexible, cubierta ligera, fachada frágil sin dilatar; 2248 son pórticos en concreto rígido cubierta pesada, fachada frágil sin dilatar y 2 estructuras en madera.

Con los resultados arrojados en el presente proyecto, se puede decir que las 4607 viviendas evaluadas mediante la metodología de CAPRA-GIS, en la comuna 2 del municipio de Dosquebradas son candidatas a colapsar ante un movimiento sísmico, teniendo en cuenta también, que muchas edificaciones no siguen los criterios de sismo resistencia, o bien son de mampostería no reforzada, con discontinuidad de columnas, irregularidad en planta y sección de elementos estructurales no óptimos; ambos estudios arrojan una alta vulnerabilidad sísmica de las edificaciones debido a la inestabilidad estructural. Es importante resaltar que, a metodología utilizada arroja resultados cualitativos que nos permite poder determinar de manera cuantitativa no solo las pérdidas físicas sino también económicas y humanas.

Con el análisis realizado, se lograron identificar las estructuras más vulnerables y de esta manera determinar puntos focales de intervención, lo cual sirve para clasificar las estructuras en nivel de prioridad en el momento de la asignación de recursos cuya gestión este encaminada al reforzamiento o prevención de riesgos, por consiguiente, se pueden generar estrategias municipales de respuesta en el caso de presentarse un evento sísmico.

La evaluación de los escenarios sísmicos arrojó que para el caso de la fuente intermedia (Ibagué) es la que representa menor grado de riesgo ante la amenaza sísmica, seguida de la fuente cercana (Romeral, Caldas) mostrando riesgos moderados en algunos tipos estructurales y críticos en otros, la fuente lejana (subducción) es la que mayor grado de afectación muestra en todos los casos evaluados. La tipología estructural PCR-RLSM-5 mostró buen comportamiento ante la amenaza sísmica, al evidenciar daños moderados y similares en las estructuras de esta tipología. De igual manera, en el estudio de evaluación de la vulnerabilidad para la comuna 9 de Armenia llevado a cabo por Torres y Aguillón, en donde se estimaron las pérdidas físicas (económicas) en el caso de eventos sísmicos en la ciudad, como resultado principal se tiene que los escenarios sísmicos evaluados, la amenaza que genera mayor riesgo en la zona de estudio, es la asociada al evento sísmico de la fuente Romeral con una magnitud $M_w=6.52$ y con una distancia de 20 km de la zona evaluada. Para este evento, se obtuvo una pérdida económica igual a \$85.710.000.000 mientras que para la comuna 2 del municipio de Dosquebradas se tiene como resultado una pérdida económica de \$18.948.149.422.

MC-RLSB-2 y MC-SLSB-1 mostró de igual manera una baja vulnerabilidad ante los eventos evaluados, por otro lado, las estructuras en Mampostería MS-RPSB-2, MS-FLSB-2 y MC-FPSB-2 fueron las que presentaron mayor grado de vulnerabilidad en donde las 2 primeras presentan pérdidas considerables en la estructura para el caso de la fuente cercana y lejana, y la última muestra daños considerables, aunque un poco menores, principalmente en el caso de la fuente lejana.

Las edificaciones que predominan en la comuna 2 se caracterizan por contar con un sistema en mampostería simple y confinada, en contravía a lo establecido según la NSR-10 título A, capítulo 12.

Las pérdidas humanas que se presentaron, para los diferentes escenarios sísmicos en las edificaciones analizadas en el municipio de Dosquebradas son bajas para los tres escenarios (cercana, intermedia, lejano), y presentan el mismo grado de riesgo; se determina un riesgo de vulnerabilidad bajo en contraste con las pérdidas físicas resultantes.

Las estructuras evaluadas presentan una alta vulnerabilidad debido a que la mayoría de las edificaciones se construyeron con técnicas tradicionales que no consideraban parámetros sísmicos para su diseño y construcción, además el municipio no ha realizado las evaluaciones exigidas

de vulnerabilidad sísmicas establecidas en la NSR-10. Capítulo A.10

La experiencia aportada por terremotos pasados (Cúcuta 1981, Popayán 1983, Eje Cafetero 1999, entre otros), ha confirmado la susceptibilidad de las edificaciones en mampostería no reforzada de adobe o ladrillo cocido, a sufrir daños o pérdidas. Además, según la revisión de los efectos de sismos con efectos de gran incidencia, realizada para el presente trabajo, el mayor número de víctimas de terremotos en América Latina, lo ha ocasionado el colapso de las edificaciones tradicionales, especialmente de adobe y ladrillo, en consecuencia, con los resultados de este estudio.

El presente documento sirve como base de apoyo para la gestión de riesgos de desastres (GRD) basados en la amenaza sísmica de estructuras indispensables en la ciudad de Dosquebradas, que puede ser utilizada por entidades como la DIGER, al Comité de Emergencias y a los Brigadistas quienes pueden encontrar información pertinente de manera práctica y clara sobre las edificaciones más críticas.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Suárez, Luís; Dávila, Nazario; Inglessis, Pether; Rivero, Pedro. Evaluación cualitativa de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones escolares en la ciudad de Mérida. Ciencia e Ingeniería, vol. 30, núm. 3, agosto-noviembre, 2009, pp. 269-278. Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela.
- [2] Muñoz, P. (2007). Determinación del índice de vulnerabilidad sísmica de las viviendas de Ciudad Bolívar evaluadas por el método cualitativo. Revista Científica, (9),241-260.
<https://doi.org/10.14483/23448350.361>
- [3] Torres-Foreroa, S., Espitia-Aguillón, C. C., & Monsalve-Jaramilloc, H. (2016). Evaluación de la Vulnerabilidad sísmica indicativa y el riesgo sísmico para un sector de la comuna 9 de Armenia (Colombia). Universidad del Quindío, Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Civil, 15.
- [4] ERN-Consorcio Evaluación de Riesgos Naturales-América Latina. (2009). Tomo I: Metodología de Modelación Probabilística de Riesgos Naturales: Informe Técnico ERN-CAPRA-T1-5 Vulnerabilidad de Edificaciones e Infraestructura.

Recuperado el 19 de febrero de 2020, de [Documento en Línea]: <https://bit.ly/2JNbCUA>

- [5] E, Yamin, L., & Tristanco, J. (2011). CAPRA-GIS. Bogotá, Colombia.
- [6] Ramírez*, H. S. (enero - junio de 2015). Reducción de la vulnerabilidad sísmica en viviendas por desarrollo progresivo con mampostería no armada1. Vol 3 No.2, 21.
- [7] Luisa Olaya*, D. R. (2014). Evaluación del comportamiento sísmico de viviendas de estratos marginales con cubiertas verdes: estudio de caso del municipio de Soacha, Colombia. Revista Ingeniería de Construcción RIC Vol 29 N°1 2014, 17.
- [8] Cardona, C. E., López, G. M., & Restrepo, D. E. (27 de 09 de 2019). repositorio.unilibrepereira.edu.co. Obtenido de <http://repositorio.unilibrepereira.edu.co:8080/pereira/bitstream/handle/123456789/678/EVALUACION%20DE%20LA%20VULNERABILIDAD%20ESTRUCTURAL.pdf?sequence=1>
- [9] Carrillo, J. (junio 12 de 2007- aceptado diciembre 21 de 2007). Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de estructuras utilizando un diseño por desempeño. 12.
- [10] Zuluaga Romero, D., Salgado-Gálvez, M., Cardona, O., & Yamín, L. (mayo de 2013). Implicaciones en la estimación del riesgo sísmico de Bogotá como resultado de una nueva interpretación sismo-tectónica -VI Congreso nacional de ingeniería sísmica. Recuperado el 07 de abril de 2020, de [Documento en Línea: UNGRD]: <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/19797>
- [11] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica-AIS. (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Bogotá: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial.
- [12] Carder, 2007. Diagnóstico de riesgos ambientales municipio de Dosquebradas Risaralda.
- [13] Acuerdo n° 014 de junio 29 de 2000 por medio del cual se adopta el plan de ordenamiento territorial para el municipio de Dosquebradas 2.000 - 2.006
- [14] Mejía, L. (2002). Gravity Concrete Frame Buildings (Predating Seismic Codes), En: Report of World Housing Encyclopedia, Earthquake Engineering Research Institute (EERI) and International Association of Earthquake Engineering (IAEE), Colomb. Colombia: World Housing Encyclopedia.
- [15] Rathje, E. (2013). Software Strata. Texas, Estados Unidos.
- [16] Cano, S. L.; Monsalve, J. H.; Agudelo, C. J.; Upegui, B. F. Y Jaramillo, F. J. Metodología para la evaluación del riesgo sísmico de pequeñas y medianas ciudades. Estudio de caso: zona centro de la ciudad de Armenia – Colombia. Universidad de Quindío. Armenia – Colombia. 2000.